

集成双波导半导体光放大器光开关 实现波长转换的理论研究*

缪庆元† 黄德修 张新亮 余永林 洪伟

(华中科技大学武汉光电国家实验室和光电子科学与工程学院, 武汉 430074)

(2006 年 5 月 6 日收到, 2006 年 8 月 3 日收到修改稿)

建立了基于集成双波导半导体光放大器的光开关(ITG-SOA-Switch)的理论分析模型.与半导体光放大器(SOA)的特性相比较表明,由于 ITG-SOA-Switch 合并了多种物理效应,故其静态增益饱和曲线在饱和功率点附近具有大幅度陡峭下降的独特性质.理论分析和 10 Gbit/s 波长转换模拟结果显示,恰当地选择输入抽运光的功率范围,ITG-SOA-Switch 波长转换器输出转换光的消光比特性较之输入抽运光会有显著的改善.

关键词:波长转换,半导体光放大器,集成双波导半导体光放大器,光开关

PACC:4265K,4282,4280S

1. 引言

集成双波导半导体光放大器(ITG-SOA)^[1]包括两个互相耦合的平行波导(见图 1).上层为提供光信号放大的有源波导,下层为完成光信号的输入和输出功能的无源波导.基于 ITG-SOA 的光开关(ITG-SOA-Switch)矩阵^[2,3]不仅拥有高开关速度(纳秒量级)和高消光比,而且同时具备光包交换和全光波长转换的功能.和其他各种波长转换器相比,ITG-SOA-Switch 波长转换器具有能够互联形成大规模波长转换器阵列的明显优势,易于实现同时对大量输入信号的动态波长分配.因此,ITG-SOA-Switch 矩阵很有希望成为下一代光包交换网络中关键的单片集成器件.虽然 ITG-SOA-Switch 的波长转换功能已经得到实验证实,但尚缺乏系统的理论和数值模拟研究为该器件的波长转换实验提供理论依据,进而找到优化波长转换性能的方法.

ITG-SOA 的有源波导即为通常的单波导结构的 SOA.受激辐射导致的载流子浓度变化将引起有源波导的材料折射率的改变^[4].由于光信号在有源波导中沿传播方向放大的同时,有源和无源波导间又存在着光功率的交流,因此有源波导的不同部分和



图 1 集成双波导半导体光放大器

无源波导间具有不同的相位匹配程度,并随入射光功率大小变化.所以,输入光功率的大小改变两波导间光功率转移的效率,影响 ITG-SOA 的放大特性.已有的模型^[1,5]对 ITG-SOA 的部分特性进行了研究,但是忽略了有源波导中载流子浓度和光功率间的相互作用,假定有源和无源波导间的相位匹配程度固定不变且沿整个传播方向一致,限制了模型的适用范围.

对此,本文考虑了载流子浓度和光功率间的相互作用以及有源和无源波导间相位匹配程度非一致的空间分布及其随输入光功率大小的变化,建立了 ITG-SOA 的分段数值模型,结合具体的材料和结构参数说明了 ITG-SOA 结构波导设计的方法,并给出了 ITG-SOA-Switch 的器件模型.在此理论模型基础上,分析了 ITG-SOA-Switch 的静态增益饱和特性和

* 国家自然科学基金(批准号:60577007)教育部新世纪优秀人才计划(批准号:NECT-04-0715)资助的课题.

† E-mail: qyuanchuang@yahoo.com.cn

产生的物理机理,及其在波长转换上的应用价值.采用数值模拟研究了 10 Gbit/s 速率下波长转换的消光比特性.因为定量分析的数值大小会随器件参数变化,所以分析中采用了与 SOA 的相应特性相比较的方式,SOA 参数的取值与 ITG-SOA-Switch 有源波导参数的取值完全一致.

2. ITG-SOA-Switch 理论模型

2.1. ITG-SOA 分段数值模型

假设波导端面完全增透,只存在前向行波.如图 2 所示,ITG-SOA 的耦合区沿纵向被等分成许多个小段,当分段数足够大时可近似地认为在每一小段 i 中各种材料和结构参数的分布是均匀的.每一小段对应于时间间隔 t 到 $t + \Delta t$, $\Delta t = \Delta z \times n_{\text{eff}}/c$, Δz 为每一小段的长度, n_{eff} 为波导有效折射率, c 为自由空间的光速. $A_{1,i}$ 和 $A_{2,i}$ 分别代表进入第 i 段无源和有源波导的归一化光场包络函数. N , n , g , β 和 Γ 分别代表载流子浓度、折射率、材料增益系数、纵向传播常数和光场限制因子.

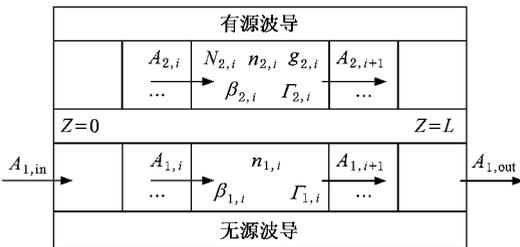


图 2 ITG-SOA 耦合区分段示意图

为描述第 i 段有源波导中载流子浓度与光功率间的相互作用,应用速率方程^[6]:

$$\frac{dN_{2,i}}{dt} = \frac{J}{ed} - R - \sum_j \frac{\Gamma_{2,i,j} g_{2,i,j} P_{2,i,j}^{av}}{A_c h \nu_j} \quad (1)$$

其中下标 j 代表不同波长的入射光波, J 代表注入电流密度, e 为电子基本电量, d 为有源区厚度, R 为复合速率项, A_c 代表有源区横截面积, h 为 Planck 常数, ν 代表入射光频, $P_{2,i,j}^{av} = (|A_{2,i,j}|^2 + |A_{2,i+1,j}|^2)/2$ 为第 j 个波长的光在有源波导第 i 段中的平均功率.

复合速率项 R 与载流子浓度 N 的关系为^[7]

$$R(N_{2,i}) = c_1 N_{2,i} + c_2 N_{2,i}^2 + c_3 N_{2,i}^3 \quad (2)$$

其中 c_1 , c_2 和 c_3 为复合常数.

材料增益系数 $g_{2,i,j}$ 采用常用的经验公式^[8,9]

$$g_{2,i,j}(N_{2,i}, \lambda_j) = g_N(N_{2,i} - N_t) - a_1(\lambda_j - \lambda_p(N_{2,i}))^2 + a_2(\lambda_j - \lambda_p(N_{2,i}))^3,$$

$$\lambda_p(N_{2,i}) = \lambda_t - a_3(N_{2,i} - N_t) \quad (3)$$

其中 g_N , a_1 , a_2 和 a_3 为增益常数, λ_t 为透明载流子浓度 N_t 时的峰值波长, λ_p 为当载流子浓度为 $N_{2,i}$ 时的峰值波长.

考虑载流子浓度对折射率的调制特性,假定折射率变化和载流子浓度线性相关,由此得出折射率的侧向分布.运用平板介质波导模型^[10],求出第 i 段有源区的侧向光场分布、模场限制因子和纵向传播常数.

t 时刻进入第 i 段的 $A_{1,i,j}$ 和 $A_{2,i,j}$ 与 $t + \Delta t$ 时刻第 i 段的输出 $A_{1,i+1,j}$ 和 $A_{2,i+1,j}$ 的关系由文献[5]导出

$$\begin{pmatrix} A_{1,i+1,j}(t + \Delta t) \\ A_{2,i+1,j}(t + \Delta t) \end{pmatrix} = T \begin{pmatrix} A_{1,i,j}(t) \\ A_{2,i,j}(t) \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$T = \begin{pmatrix} e^{-j\beta_{1,i,j}\kappa_{i,j}\Delta z} \cos^2 \psi_{i,j} + e^{j\beta_{1,i,j}\kappa_{i,j}\Delta z} \sin^2 \psi_{i,j} & \sin \psi_{i,j} \cos \psi_{i,j} (e^{-j\beta_{1,i,j}\kappa_{i,j}\Delta z} - e^{j\beta_{1,i,j}\kappa_{i,j}\Delta z}) \\ \sin \psi_{i,j} \cos \psi_{i,j} (e^{-j\beta_{1,i,j}\kappa_{i,j}\Delta z} - e^{j\beta_{1,i,j}\kappa_{i,j}\Delta z}) & e^{-j\beta_{1,i,j}\kappa_{i,j}\Delta z} \sin^2 \psi_{i,j} + e^{j\beta_{1,i,j}\kappa_{i,j}\Delta z} \cos^2 \psi_{i,j} \end{pmatrix} \times e^{\frac{g_{2\text{net},i,j} - j\alpha_{\text{int}}(\beta_{1,i,j} + \beta_{2,i,j})}{4} \Delta z}$$

$$\begin{aligned} \phi_{i,j} &= [(\Delta\beta_{i,j} + j\delta_{i,j})^2 + 1]^2, \\ \tan \psi_{i,j} &= -\Delta\beta_{i,j} - j\delta_{i,j} + \phi_{i,j}, \\ \Delta\beta_{i,j} &= (\beta_{1,i,j} - \beta_{2,i,j})2\kappa_{i,j}, \end{aligned}$$

$$\delta_{i,j} = -g_{2\text{net},i,j}/4\kappa_{i,j},$$

$$g_{2\text{net},i,j} = \Gamma_{2,i,j}g_{2,i,j} - \alpha_{\text{int}},$$

其中 α_{int} 和 g_2 分别为有源波导的内部损耗系数和材料

增益系数 κ 是有源和无源波导间的耦合系数^[10]. 此处, 净模增益系数 g_{2net} 和文献 [5] 中归一化幅度增益系数 g_{2A} 的关系为 $g_{2net} = 2\kappa g_{2A}$; 同时假定无源波导的净模增益系数 $g_{1net} = 0$.

输入光信号在 SOA 中的传播可表示为

$$A_{2,ii,j}(t + \Delta t) = e^{\left(\frac{g_{2net,ii,j} - \beta_{2,ii,j}}{2}\right)\Delta z} A_{2,ii,j}(t), \quad (5)$$

将方程 (1) 和 (4) 以及平板介质波导模型相结合, ITG-SOA 各参数的纵向变化和时间相关可自恰地解得. 以方程 (5) 代替方程 (4), 同样可得到 SOA 中相关参数的变化.

2.2. ITG-SOA 结构波导设计

如表 1 所示, 选择目前长波长光通信器件广泛采用的 InGaAsP/InP 作为 ITG-SOA 的材料. 其中, 有源波导材料为与 InP 晶格匹配、带隙波长为 $1.55 \mu\text{m}$ 的体材料 $\text{In}_{0.42}\text{Ga}_{0.58}\text{As}_{0.9}\text{P}_{0.1}$, 无源波导为与 InP 晶格匹配、带隙波长为 $1.2 \mu\text{m}$ 的体材料 $\text{In}_{0.81}\text{Ga}_{0.19}\text{As}_{0.43}\text{P}_{0.57}$. 各层材料的折射率、折射率变化以及有源波导材料的微分折射率系数 dn/dN (见表 2) 根据文献 [4, 11] 计算得出.

表 1 ITG-SOA 各层参数 ($T = 300\text{K}$)

层号	材料	层厚度	折射率	折射率变化
1	p-InP		3.1817	0.0017*
2	$\text{In}_{0.42}\text{Ga}_{0.58}\text{As}_{0.9}\text{P}_{0.1}$	$0.144 \mu\text{m}$	3.6331	-0.0937^{**}
3	n-InP	$0.54 \mu\text{m}$	3.1817	0.0002*
4	$\text{n-In}_{0.81}\text{Ga}_{0.19}\text{As}_{0.43}\text{P}_{0.57}$	$0.6 \mu\text{m}$	3.3262	0.0010*
5	n-InP		3.1817	0.0002*

* 掺杂导引的折射率变化, 掺杂浓度为 $3 \times 10^{23} \text{m}^{-3}$.

** 注入载流子导引的折射率变化, 载流子浓度为 $3 \times 10^{24} \text{m}^{-3}$.

为使 ITG-SOA 有效的工作, 必须保证在工作电流注入且无入射光的情况下, 有源波导的有效折射率和无源波导的有效折射率相等或接近. 由于在电流注入后, 有源波导的材料折射率仍然高于无源波导的材料折射率, 必须使有源波导的厚度小于无源波导, 以便在电流注入后两波导间满足相位匹配条件. 设计两波导的厚度参数必须使器件在 $1.55 \mu\text{m}$ 窗口单模工作, 同时有源波导应有合适的模场限制因子. 计算采用的其他参数由表 2 给出^[8]. 为简单起见, 仅考虑 TE 模的情况.

设无源波导端面入射连续光的功率为 -23dBm ,

波长为 1550nm 小信号放大时有源和无源波导中光功率沿光场传播方向 (z 方向) 的分布如图 3 所示. 图中纵坐标为归一化光功率, 即纵向各点的光功率与入射光功率的比值 (P/P_{in}). 图中同时描述了光信号在单波导 SOA 中沿纵向的放大过程. 在 $400 \mu\text{m}$ 和 $800 \mu\text{m}$ 耦合区长度处, 无源波导中将分别出现小信号放大时的第二个和第三个光功率峰值, 第一个功率峰值点为入射端. 为了得到最大的增益, 取 ITG-SOA 耦合区的长度为 $400 \mu\text{m}$ 或 $800 \mu\text{m}$, 并将相应的 ITG-SOA 分别简称为 ITG-SOA ($400 \mu\text{m}$) 和 ITG-SOA ($800 \mu\text{m}$). 因为无源波导中第二个和第三个光功率峰值的位置会随着间隔层的厚度或其他参数变化, 所以 ITG-SOA ($400 \mu\text{m}$) 和 ITG-SOA ($800 \mu\text{m}$) 实际上代表了两种不同类型的 ITG-SOA. 图 3 中 $400 \mu\text{m}$ 长的 SOA 的小信号放大倍数与 ITG-SOA ($800 \mu\text{m}$) 相等, 功率增益分贝数为同长度的 ITG-SOA ($400 \mu\text{m}$) 的两倍. 这是因为光信号在 ITG-SOA 的每一个波导中都经历了一半的时间, 其小信号增益为两波导的平均值.

表 2 计算中采用的其他参数值

参数	取值	参数	取值
c_1	$2.5 \times 10^8 \text{s}^{-1}$	g_N	$2.5 \times 10^{-20} \text{m}^2$
c_2	$1 \times 10^{-16} \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	λ_t	$1.617 \mu\text{m}$
c_3	$9.4 \times 10^{-41} \text{m}^6 \cdot \text{s}^{-1}$	N_t	$0.9 \times 10^{24} \text{m}^{-3}$
a_1	$7.4 \times 10^{18} \text{m}^{-3}$	α_{int}	2000m^{-1}
a_2	$3.155 \times 10^{25} \text{m}^{-4}$	dn/dN	$-2.08 \times 10^{-26} \text{m}^3$
a_3	$3 \times 10^{-32} \text{m}^4$	J	$9.65 \times 10^7 \text{A} \cdot \text{m}^{-2}$

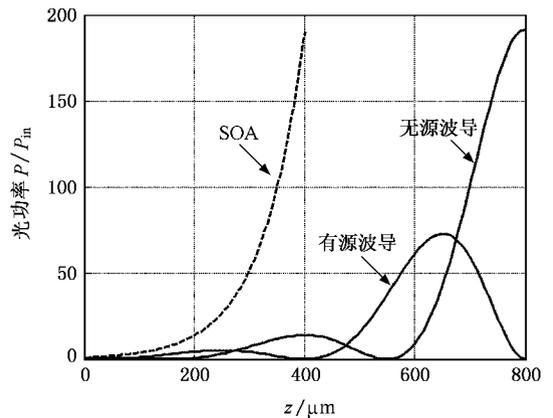


图 3 有源和无源波导中光功率的纵向分布

2.3. ITG-SOA-Switch 和 ITG-SOA 之间的联系

以下研究基于 ITG-SOA(400 μm)的 ITG-SOA-Switch.

ITG-SOA-Switch 器件模型是 ITG-SOA(400 μm)结构的变形,包含两个等长的有源垂直耦合器(AVC),AVC1 和 AVC2.在 ITG-SOA(400 μm)耦合区的中间位置处,无源波导被截断,同时有源波导通过全内反射(TIR)镜相互连接,见图 4.

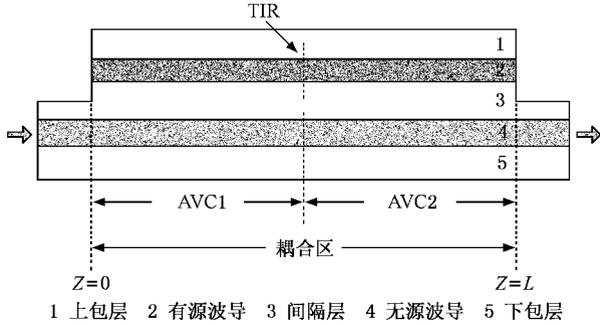


图 4 ITG-SOA-Switch 器件模型示意图

3. ITG-SOA-Switch 静态增益饱和特性

图 5 为入射连续光波长为 1550 nm 时,计算所得 ITG-SOA-Switch 的静态增益饱和特性曲线.为比较,图中同时用虚线绘出了 SOA 的情况.当输入光功率增加到接近饱和输入光功率(增益比小信号增益下降 3 dB 时对应的入射光功率)时,ITG-SOA-Switch 的增益会陡峭地下降,迅速地达到饱和,并持续大幅度地下降到第一个增益极小值点.随着输入功率的继续增大,增益在总体上呈现下降趋势的同时,表现出上下波动的特性.这和 SOA 的静态增益

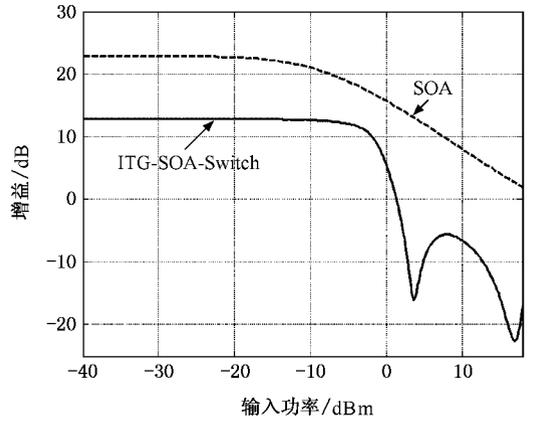


图 5 ITG-SOA-Switch 的增益随入射光功率大小的变化

饱和曲线平缓单调地下降明显不同.

上述特点源于 ITG-SOA-Switch 合并了一系列物理效应:1)ITG-SOA-Switch 的有源波导基于载流子消耗引起增益饱和的交叉增益调制效应(XGM);2)饱和导致的有源和无源波导间的相位失配.输入光功率通过改变有源波导的饱和程度调制两波导间的相位失配程度.相位失配不仅使得有源和无源波导间不能够实现完全的功率交换,而且两波导间功率交换的周期也将缩短;3)入射功率的增加同时改变 AVC1 中的光功率从 AVC1 的有源波导传送到 AVC2 的有源波导中的比例,这是 ITG-SOA-Switch 与 ITG-SOA 的有别之处.

ITG-SOA-Switch 的静态增益饱和曲线大幅度陡峭下降的显著特点在波长转换上具有重要的应用价值.在饱和功率附近恰当地选择输入抽运光的高、低功率,将引起 ITG-SOA-Switch 的增益出现比 SOA 大得多的调制度,呈反向调制的增益可对同时注入的探测光进行调制.可以预见,与 XGM 波长转换会降低消光比不同,利用 ITG-SOA-Switch 进行波长转换

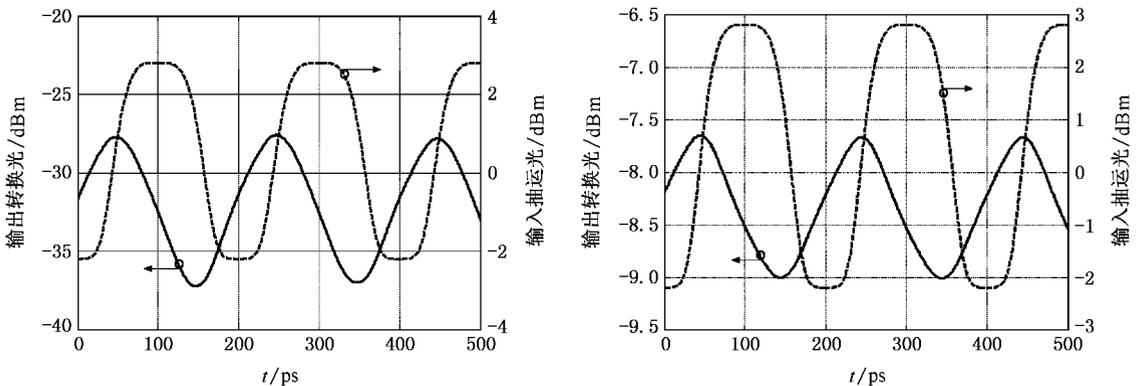


图 6 10 Gbit/s 波长转换 (a)ITG-SOA-Switch 输出信号 (b)XGM 输出信号

可以改善波长转换信号的消光比.

4. ITG-SOA-Switch 实现 10 Gbit/s 波长转换的数值模拟

出于比较的目的,同时模拟了基于 ITG-SOA-Switch 的波长转换以及基于 SOA 的 XGM 波长转换. 设输入的抽运光信号为 10 Gbit/s 的“1010”码,峰值功率为 2.8 dBm,消光比为 5 dB,波长为 1550 nm. 连续的探测光功率为 -20 dBm,波长为 1535 nm. 计算得到的输出转换光如图 6 中的实线所示,其中图 6(a)为 ITG-SOA-Switch 的输出转换光,6(b)为 XGM 输出转换光. 图中同时用虚线标出了输入抽运光的时域波形. 可以看出,图 6(a)和 6(b)中转换光的波形基本相同,但 ITG-SOA-Switch 输出转换光的消光比为 9.5 dB,而此时 XGM 输出转换光的消光比已经退

化到 1.3 dB.

5. 结 论

本文建立了较为完整的 ITG-SOA-Switch 的理论模型. 模型中考虑了载流子浓度和光功率间的相互作用以及有源和无源波导间相位匹配程度的纵向变化及其受输入光功率大小的影响. 由于 ITG-SOA-Switch 合并了交叉增益调制、相位失配程度调制、以及传送比例调制等一系列物理效应,其静态增益饱和曲线在饱和功率点附近随着输入光功率的增大陡峭下降. 理论分析和 10 Gbit/s 波长转换数值模拟结果表明:适当选择输入抽运光的高、低输入功率,ITG-SOA-Switch 波长转换器可以显著地改善波长转换信号的消光比特性.

- [1] Kambayashi T, Suematsu Y 1981 *The Trans. of the IECE of Japan* **E 64** 489
- [2] Lee S-C, Varrazza R, Yu S 2005 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **17** 1085
- [3] Varrazza R, Wonfor A, Yu S, Cakmak B, Pentty R V, White I H 2000 *Proceedings of ECOC2000* **4** 67
- [4] Bennett B R, Soref R A, Del Alamo J A 1990 *IEEE J. Quantum Electron.* **26** 113
- [5] Thompson G H B 1986 *J. Lightwave Technol.* **4** 1678
- [6] Zhang X L, Dong J J, Wang Y, Huang D X 2005 *Acta Phys. Sin.*

54 2066 (in Chinese) [张新亮、董建绩、王 颖、黄德修 2005 物理学报 **54** 2066]

- [7] Zhang X L, Huang D X, Sun J Q, Liu D M 2001 *Chin. Phys.* **10** 124
- [8] Willner A E, Shieh W 1995 *J. Lightwave Technol.* **13** 771
- [9] Wang Y, Zhang X L, Huang D X 2004 *Chin. Phys.* **13** 882
- [10] Yariv A 1997 *Optical electronics in Modern Communications* (Oxford : Oxford University Press, Inc.) p491
- [11] Weber J P 1994 *IEEE J. Quantum Electron.* **30** 1801

Theoretical study of wavelength conversion based on integrated twin-guide semiconductor optical amplifier optical switch *

Miao Qing-Yuan[†] Huang De-Xiu Zhang Xin-Liang Yu Yong-Lin Hong Wei

(*Wuhan National Laboratory for Optoelectronics , Institute of Optoelectronics Science and Engineering ,
Huazhong University of Science and Technology , Wuhan 430074 , China*)

(Received 6 May 2006 ; revised manuscript received 3 August 2006)

Abstract

A model of integrated twin-guide semiconductor optical amplifier optical switch(ITC-SOA-Switch) is proposed. Comparison analyses with semiconductor optical amplifier(SOA) reveals that because of the combination of several physical effects by ITC-SOA-Switch , only a small increase of input power around 3 dB saturation point can cause a big decrease of gain. Theoretical analyses and the simulation results of 10Gbit/s wavelength conversion indicate that the extinction ratio of output converted signal of ITC-SOA-Switch can be greatly improved compared with that of input pump signal in a moderate pump power range.

Keywords : wavelength conversion , semiconductor optical amplifier , integrated twin-guide semiconductor optical amplifier , optical switch

PACC : 4265K , 4282 , 4280S

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60577007) and the Program for New Century Excellent Talents in University (Grant No. NECT-04-0715).

[†] E-mail : qyuanchuang@yahoo.com.cn